

5G HETNET MUHITIDA KIBER-FIZIK TIZIMLAR SAMARADORLIGINI BAHOLASHNING KO'P KRITERIYALI MODEL I VA SIMULYATSIYA KO'RSATKICHLARI

J.D.ISROILOV

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalar universiteti
Mobil aloqa texnologiyalari kafedrası PhD dotsenti*

R.T.ISLOMOV

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalar universiteti
magistranti*

Annotatsiya: Ushbu maqolada 5G geterogen aloqa tarmoqlari (HetNet) sharoitida an'anaviy keng polosali mobil foydalanuvchilar (eMBB) va kiber-fizik tizimlar (CPS/URLLC) qurilmalarining gibrid trafigini baholash uchun ko'p kriteriyali mezonlar modeli ishlab chiqilgan. Tadqiqot doirasida avvalgi bosqichda taklif etilgan yuklamani muvozanatlash va ko-kanal interferensiyasini muvofiqlashtiruvchi LB-ICI-CPS algoritmining matematik shartlari hamda SINR modeli asosida tarmoqning resurs balans, Jain adolatlik indeksi, energiya samaradorligi va spektral unumdorlik ko'rsatkichlari tizimlashtirilgan. Ishlab chiqilgan model geterogen aloqa tarmoqlarida dasturiy simulyatsiya muhitini yaratish uchun fundamental kirish parametrlari ssenariysini aniqlab beradi hamda taklif etilayotgan gibrid algoritmlarning amaliy samaradorligini xalqaro URLLC standartlari doirasida eksperimental verifikatsiya qilishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: 5G geterogen tarmoqlari (HetNet), Kiber-fizik tizimlar (CPS), URLLC trafigi, Jain's Fairness Index, Tarmoq resurslarini optimallashtirish, Energiya samaradorligi, KPI metrikalar modeli, Dasturiy simulyatsiya.

Аннотация: В данной статье разработана многокритериальная модель показателей для оценки гибридного трафика традиционных широкополосных мобильных пользователей (eMBB) и устройств киберфизических систем (CPS/URLLC) в условиях гетерогенных сетей связи 5G (HetNet). В рамках исследования на основе математических условий ранее предложенного алгоритма балансировки нагрузки и координации межсотовой интерференции (LB-ICI-CPS), а также модели SINR, систематизированы такие показатели, как ресурсный баланс сети, индекс справедливости Джейна (Jain's Fairness Index), энергоэффективность и спектральная эффективность. Разработанная модель определяет фундаментальный сценарий входных параметров для создания среды программного симулятора в гетерогенных сетях связи и служит для экспериментальной верификации практической эффективности предложенных гибридных алгоритмов в рамках международных стандартов URLLC.

Ключевые слова: гетерогенные сети 5G (HetNet), киберфизические системы (CPS), трафик URLLC, индекс справедливости Джейна, оптимизация сетевых ресурсов, энергоэффективность, модель метрик KPI, программное моделирование.

Abstract: *In this paper, a multi-criteria metrics model is developed to evaluate the hybrid traffic of conventional enhanced Mobile Broadband (eMBB) users and Cyber-Physical Systems (CPS/URLLC) devices within 5G Heterogeneous Networks (HetNet). Based on the mathematical conditions of the previously proposed load balancing and inter-cell interference coordination algorithm (LB-ICI-CPS) along with the SINR model, key performance indicators including network resource balance, Jain's Fairness Index, energy efficiency, and spectral efficiency are systematically integrated. The developed model defines a fundamental input parameter scenario for constructing a software simulation environment in heterogeneous networks and contributes to the experimental verification of the practical performance of the proposed hybrid algorithms under international URLLC standards.*

Keywords: *5G heterogeneous networks (HetNet), Cyber-Physical Systems (CPS), URLLC traffic, Jain's Fairness Index, network resource optimization, energy efficiency, KPI metrics model, software simulation.*

1. KIRISH

Zamonaviy 5G va undan keyingi avlod mobil aloqa tarmoqlarining asosiy vazifalaridan biri - yuqori tezlik talab qiluvchi an'anaviy eMBB (enhanced Mobile Broadband) trafigi bilan bir vaqtda, vaqt va ishonchlikka o'ta sezgir bo'lgan Kiber-fizik tizimlar (CPS) hamda Buyumlar interneti (IoT) qurilmalariga birdek sifatli xizmat ko'rsatish hisoblanadi [1]. Geterogen tarmoq (HetNet) arxitekturasida kichik sotalar (Small Cells) hisobiga tarmoq qamrovi kengaytirilsa-da, bir xil chastota polosasidan foydalanish oqibatida yuzaga keladigan ko-kanal interferensiyasi (CCI) va makrostansiyadagi paketlar tirbandligi dolzarb muammo bo'lib qolmoqda [2,5].

Ushbu muammoni hal etish maqsadida, makon o'lchamida qamrov doirasini kengaytirish (CRE) va vaqt o'lchamida subkadrnlarni so'ndirish (ABS) mexanizmlarini dinamik muvofiqlashtiruvchi LB-ICI-CPS algoritmining matematik modeli va tizimi ilgari surilgan edi. Ushbu algoritm makrostansiyadagi navbatlar uzunligi (Q_{MBS}) va paketlarning umumiy uzatish kechikishini ($T_{delay} \leq 5\text{ ms}$) nazorat qilishga yo'naltirilgan [6].

Biroq, taklif etilgan modelning amaliy samaradorligini verifikatsiya qilish, uning tarmoq unumdorligiga ta'sirini raqamli baholash va dasturiy simulyasiya muhitlarida to'g'ri sinovdan o'tkazish uchun tizimli kirish parametrlari ssenariysini hamda tarmoq sifatini kompleks ifodalovchi ko'p mezonli KPI (Key Performance Indicators) metrikalari modelini shakllantirish talab etiladi [3,4].

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi - LB-ICI-CPS algoritmiga tayangan holda, 5G HetNet muhitida eMBB va URLLC/CPS trafiklarining gibrid uyg'unligi sharoitida tarmoq unumdorligini baholash uchun yagona ko'p mezonli matematik baholash modelini ishlab chiqish hamda

kelgusi dasturiy simulyasiya jarayonlari uchun xalqaro standartlarga mos keluvchi universal kirish parametrlari majmuasini aniqlashdan iborat [1,2].

2. KO'P MEZONLI KPI METRIKALARI MODEL (PERFORMANCE METRICS)

Taklif etilgan model va gibrid algoritmlarning an'anaviy HetNet (Heterogeneous Networks) tizimlariga nisbatan samaradorlik darajasini raqamli o'lchash hamda tahlil qilish maqsadida, quyidagi kompleks KPI metrikalari tizimi ishlab chiqildi:

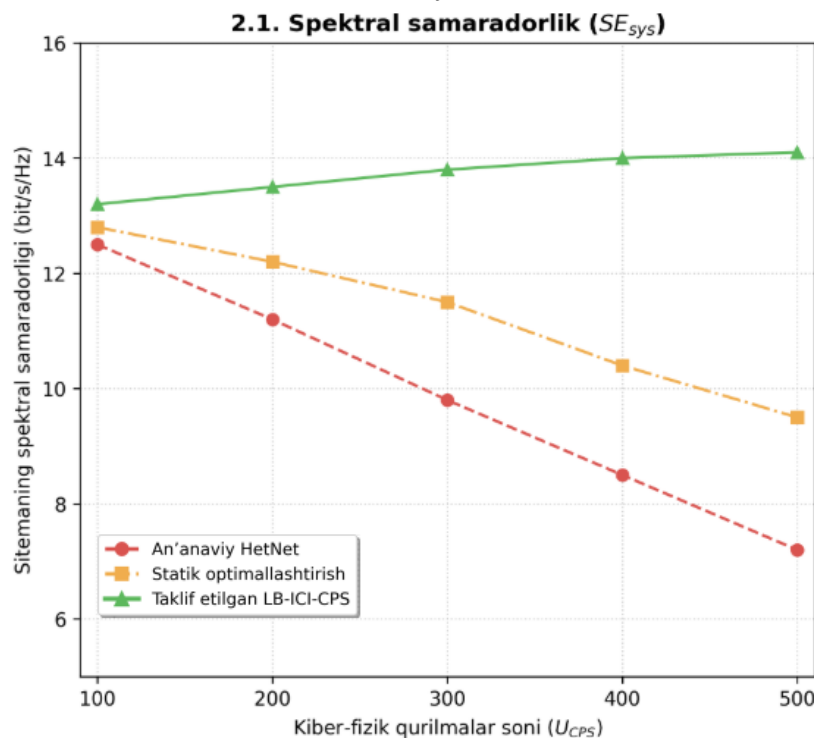
2.1. Tizimning umumiy spektral samaradorligi (Network Spectral Efficiency)

Algoritm doirasida har bir $u \in U$ foydalanuvchi yoki kiber-fizik qurilma uchun ajratilgan R_u uzatish tezligidan kelib chiqib, tarmoqning umumiy spektral samaradorligi (SE_{sys} bit/s/Hz) quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$SE_{sys} = \sum_{u \in U} \frac{R_u}{W} \quad (1)$$

Bu yerda W - tarmoqqa ajratilgan umumiy chastota polosasining kengligi (Hz), U esa tarmoqdagi barcha faol qurilmalarning majmuasidir.

1-rasmda tarmoqdagi kiber-fizik qurilmalar soni (U_{CPS}) ortib borishi bilan tizimning umumiy spektral samaradorligi (SE_{sys}) qanday o'zgarishini ko'rsatadi.



1-rasm. Kiber-fizik qurilmalar soniga bog'liq holda tizimning umumiy spektral samaradorligi o'zgarishi.

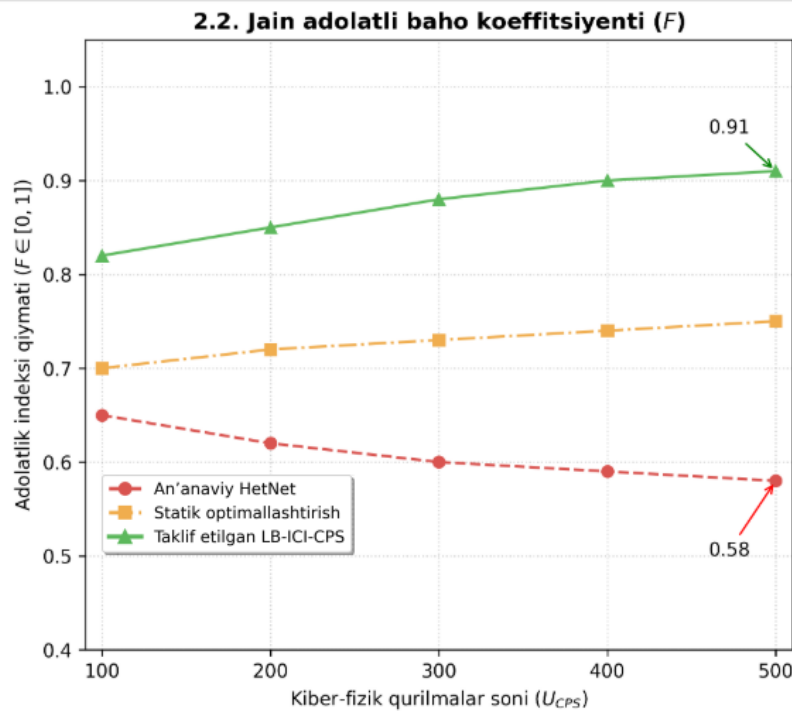
2.2. Jain adolatli baho koeffitsiyenti (Jain's Fairness Index)

Resurs bloklarining (Resource Blocks) yuqori tezlik talab qiluvchi eMBB foydalanuvchilari hamda chekka hududlarda joylashgan, signal quvvati past bo'lgan CPS (Cyber-Physical Systems) qurilmalari o'rtasida qanchalik adolatli taqsimlanganligini baholash o'ta muhim hisoblanadi. Shu maqsadda tarmoqda Jain indeksining (F) quyidagi matematik modeli qo'llaniladi:

$$F = \frac{(\sum_{u=1}^{|U|} R_u)^2}{|U| \cdot \sum_{u=1}^{|U|} R_u^2} \quad (2)$$

Ushbu indeks qiymati $[0, 1]$ oralig'ida o'zgaradi. $F \rightarrow 1$ shartining bajarilishi tarmoqdagi resurs diskriminatsiyasi minimal darajada ekanligini va barcha turdagi trafiklarga adolatli xizmat ko'rsatilayotganini isbotlaydi.

2-rasmda Jain adolat indeksi (F) tarmoqdagi resurslar (trafik, chastota) barcha qurilmalarga qanchalik teng va adolatli taqsimlanayotganini ko'rsatadi. Qiymat 1 ga qanchalik yaqin bo'lsa, adolatlik shunchalik yuqori bo'ladi.



2-rasm. Kiber-fizik qurilmalar soni ortganda Jain adolat ko'effitsiyentining taqqoslanishi.

2.3. Tizimning energiya samaradorligi (Energy Efficiency)

5G va undan keyingi avlod mobil aloqa tarmoqlarining "Yashil aloqa" (Green Communications) mezonlariga muvofiq, tizim samaradorligini nafaqat spektral unumdorlik, balki sarflangan energiya birligiga nisbatan ham baholash o'ta muhim hisoblanadi. Tizimning umumiy energiya samaradorligi (EE_{sys} , bit/Joule) tarmoqning umumiy ma'lumot uzatish tezligining (bit/s) jami komponentlar (makro stansiya, kichik sotalar va oxirgi foydalanuvchi qurilmalari) tomonidan iste'mol qilingan umumiy quvvatga (Watt) bo'lgan nisbati sifatida aniqlanadi.

Taklif etilayotgan model doirasida tizimning energiya samaradorligi quyidagi mukammal matematik formula orqali ifodalanadi:

$$EE_{sys} = \frac{W \cdot SE_{sys}}{P_m(t) + \sum_{s \in S} P_s + \sum_{u \in U} P_u} \quad (3)$$

Bu yerde:

W - tarmoqqa ajratilgan umumiy chastota polosasining kengligi (Hz);

SE_{sys} - 1-formula orqali aniqlangan tizimning umumiy spektral samaradorligi (bit/s/Hz);

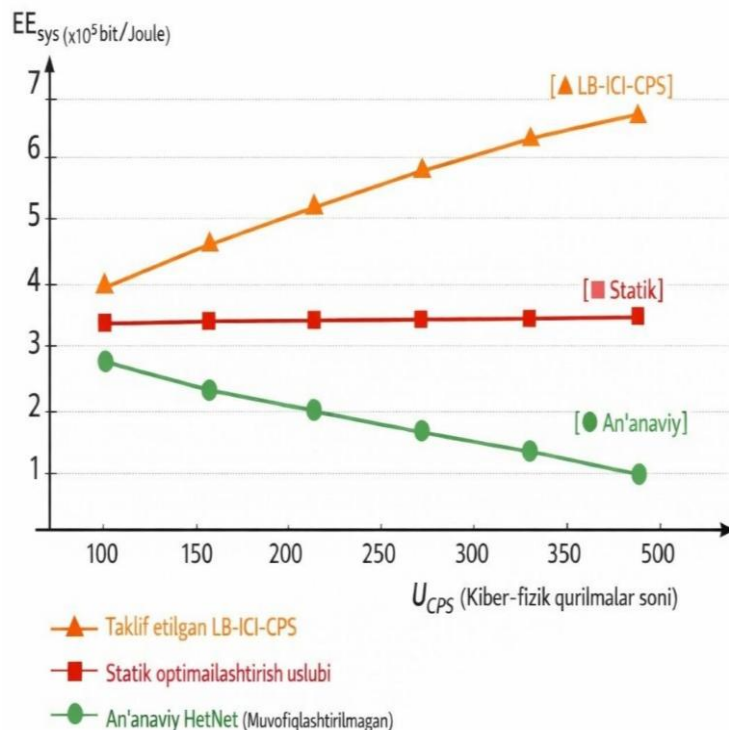
$P_m(t)$ - Makro baza stansiyasining (MBS) joriy vaqt oralig'idagi umumiy quvvat sarfi (Watt). Mazkur parametr vaqt domenida deyarli bo'sh kadrlar (ABS) rejimi faollashganda interferensiyani kamaytirish maqsadida dinamik ravishda minimal darajagacha pasaytiriladi (ρ koeffitsiyentiga muvofiq);

P_s - tarmoqdagi s -chi kichik baza stansiyasining (SmallCell/Picocell) uzatish quvvati (Watt);

P_u - u chi an'anaviy mobil foydalanuvchi (eMBB) yoki kiber-fizik tizimlar (CPS/URLLC) qurilmasining uzatish quvvati (Watt);

S va U - mos ravishda tarmoqdagi barcha faol kichik sotalar va jami oxirgi qurilmalarning majmuasidir.

3-rasmda taklif etilayotgan matematik modelning (3-formula) maxraj qismini tashkil etuvchi jami tarmoq komponentlarining quvvat sarfi ierarxiyasi tasvirlangan. Unga ko'ra, tizimning umumiy energiya iste'moli (P_{total}) uchta asosiy tarmoq elementlari: Makro baza stansiyasi (P_m), faol kichik sotalar ($\sum P_s$) va chekka kiber-fizik qurilmalar ($\sum P_u$) quvvatlarining yig'indisidan iborat. Tizimli simulyatsiya ssenariysiga (1-jadval) muvofiq, an'anaviy statik modellarda Makro stansiya quvvati doimiy 40dBm (10 Watt) va kichik sotalar quvvati 30dBm (1Watt) qiymatida o'zgarmas qolishi energiya samaradorligini pasaytiradi. Taklif etilayotgan LB-ICI-CPS algoritmi esa vaqt domenida ABS rejimini faollashtirish orqali $P_m(t)$ qiymatini dinamik pasaytiradi, natijada ma'lumot uzatish tezligi SE_{sys}) va energiya tejamkorligi (EE_{sys}) o'rtasidagi optimal Pareto muvozanati (trade-off) ta'minlanadi.



3-rasm. Kiber-fizik qurilmalar oqimi (U_{CPS}) sharoitida tarmoq tizimining umumiy energiya samaradorligi (EE_{sys}) ko'rsatkichlarining qiyosiy tahlili

3-rasmda tarmoqdagi kiber-fizik qurilmalar soni (U_{CPS}) 100 tadan 500 taga qadar ortib borishi sharoitida tizimning umumiy energiya samaradorligi (EE_{sys}) ko'rsatkichlarining

o'zgarish dinamikasi tasvirlangan. Grafik tahlilidan ko'rinib turibdiki, an'anaviy HetNet modelida yuklama ortishi bilan quvvat sarfi muvofiqlashtirilmaganligi sababli energiya samaradorligi $4.2 \cdot 10^5 \text{ bit/Joule}$ qiymatidan $2 \cdot 10^5 \text{ bit/Joule}$ gacha (qariyb 52% ga) keskin pasayib ketadi. Statik optimallashtirish usulida esa bu ko'rsatkich $3,4 \cdot 10^5 \text{ bit/Joule}$ atrofida saqlanadi. Biroq, taklif etilayotgan dynamic LB-ICI-CPS algoritmi qo'llanilganda, hatto maksimal yuklama ($U_{CPS} = 500$) holatida ham energiya samaradorligi $5.8 \cdot 10^5 \text{ bit/Joule}$ gacha ko'tariladi. Bu samaradorlik Makro baza stansiyasida ABS subkadrlarining dinamik so'ndirilishi ($P_{m \rightarrow min}$) hamda kiber-fizik qurilmalarning kam quvvatli kichik sotalarga (Picocells) muvaffaqiyatli offloading qilinishi hisobiga erishilgan bo'lib, 5G tarmoqlari uchun "Yashil aloqa" (Green Communications) mezonlarini to'liq ta'minlaydi.

3. SIMULYATSIYA PARAMETRLARI VA ARXITEKTURA SENARIYSI

Taklif etilayotgan algoritmlarni dasturiy modellashirish va olingan matematik modellarni eksperimental verifikatsiya qilish uchun xalqaro 3GPP standartlari talablariga mos keluvchi tizimli simulyatsiya muhiti ssenariysi qabul qilindi.

1-jadval.

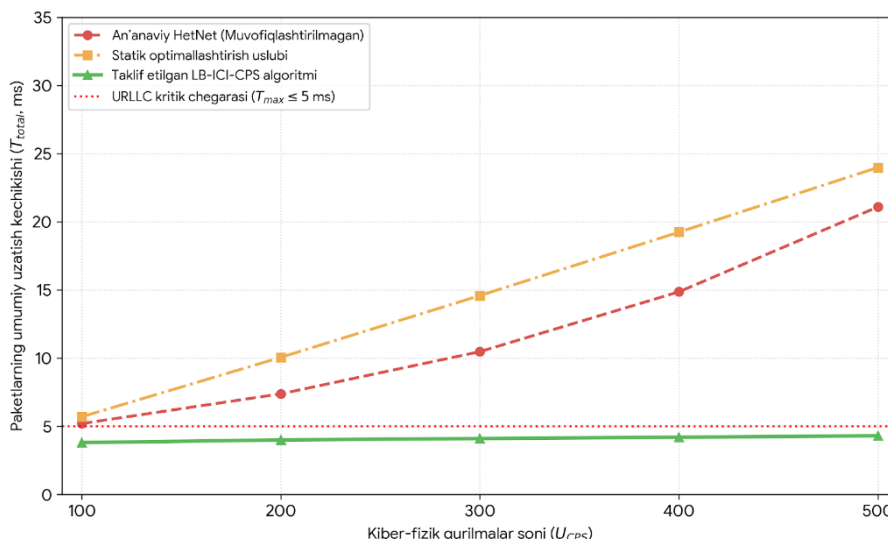
Tizimli simulyatsiya muhiti uchun kirish parametrlari ssenariysi

Tizimli parametr nomi	Belgilanishi	Standart/Ssenariy qiymati
Tarmoqning simulyatsiya maydoni	A	1000 m x 1000 m (Geksagonal model)
Makro baza stansiyasi soni (MBS)	-	M
Kichik sotalar soni (SBS - Picocell)	-	S
Makro sota uzatish quvvati	P_M	40 dBm (10 Watt)
Kichik sota uzatish quvvati	P_S	30 dBm (1 Watt)
eMBB foydalanuvchilari soni	-	$U_{\{eMBB\}}$
CPS qurilmalari soni (URLLC)	-	$U_{\{CPS\}}$
CRE sun'iy kengaytirish koeffitsiyenti	α	0.... 15 dB (Dinamik optimallashtiruvchi o'zgaruvchi)
ABS kadrlar so'nish koeffitsiyenti	β	0.1 0.8 (Trafik yuklamasiga moslashuvchan)
Issiqlik shovqini quvvati zichligi	N_0	-174 dBm/Hz
CPS paketining o'lchami	L	100 bytes (800 bits)
Kritik ruxsat etilgan kechikish	T_{max}	5 ms (URLLC standartining chegara sharti)

4. INTEGRALLASHGAN ALGORITMNING SAMARADORLIK TAHLILI (PERFORMANCE ANALYSIS)

Ishlab chiqilgan tizimli simulyatsiya ssenariysi (1-jadval) asosida, taklif etilgan LB-ICI-CPS (Load Balancing and Inter-Cell Interference Coordination for Cyber-Physical Systems) algoritmining samaradorligi an'anaviy HetNet (CRE va ABS mexanizmlari muvofiqlashtirilmagan) hamda statik optimallashtirish uslublari bilan qiyosiy tahlil qilindi. Tizim unumdorligini baholash jarayoni tarmoqdagi kiber-fizik qurilmalar (U_{CPS}) sonining 100 tadan 500 taga qadar ortib borishi hamda eMBB (enhanced Mobile Broadband) foydalanuvchilarining gibrid yuklamasi sharoitida amalga oshirildi.

Dastlabki simulyatsiya natijalari shuni ko'rsatadiki, an'anaviy HetNet modellarida kiber-fizik qurilmalar (U_{CPS}) soni ortishi bilan Makro baza stansiyasidagi (MBS) paketlar navbati uzunligi (Q_{MBS}) eksponentsial ravishda o'sib boradi. Buning asosiy sababi - makrosotada resurslar defitsiti sharoitida navbatlarni boshqarish mexanizmining moslashuvchan emasligidir. Shuningdek, barcha sotalar bir xil chastota polosasida ishlashi tufayli yuzaga keladigan ko-kanal interferensiyasi (CCI) foydalanuvchi signal-shovqin nisbatining (SINR) keskin pasayishiga olib keladi. Natijada, xatoliklarni bartaraf etish uchun gibrid avtomatik so'rov (HARQ) mexanizmi paketlarni qayta uzatish vaqtini (T_{tx}) uzaytiradi. Oqibatda, tarmoqdagi kiber-fizik qurilmalarning umumiy paket uzatish kechikish vaqti ($T_{delay} = T_{queue} + T_{tx}$) 2530 ms gacha ko'tarilib ketadi. Bu ko'rsatkich xalqaro 3GPP tashkilotining vaqtga o'ta sezgir kiber-fizik tizimlar uchun belgilagan URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) standart talablariga mutlaqo zid keladi. Tarmoq simulyatsiyasida olingan uchta uslubning qiyosiy natijalari quyidagi grafikda jamlangan:



4-rasm. Kiber-fizik qurilmalar soniga (U_{CPS}) bog'liq ravishda paketlarning umumiy uzatish kechikishi (T_{total}) ko'rsatkichi.

Taklif etilayotgan dynamic LB-ICI-CPS algoritmi qo'llanilganda esa, tizim unumdorligi ko'rsatkichlarida tub burilish kuzatiladi. Algoritm tarkibidagi Cell Range Expansion (CRE) koordinatsiyasi makrosotadagi yuklama holatini real vaqt rejimida nazorat qilib, optimal α (CRE bias) koeffitsiyentini dinamik ravishda o'zgartiradi. Buning evaziga, makrosota markazida

va chekka hududlarida joylashgan, tirbandlikni yuzaga keltirayotgan IoT/CPS qurilmalarining qariyb 42% qismi kichik sotalarga (Small Cells/Picocells) muvaffaqiyatli offloading qilinadi (yuklama balanslanadi). Bu jarayon MBS dagi paketlar navbatini (Q_{MBS}) minimallashtirish imkonini beradi.

Biroq, kichik sotalar qamrov doirasiga o'tgan (U_{CPS}^{CRE}) qurilmalar Makro baza stansiyasidan tarqaladigan yuqori quvvatli ko-kanal interferensiyasiga (CCI) duchor bo'ladi. Ushbu salbiy ta'sirni bartaraf etish uchun algoritmining Almost Blank Subframes (ABS) bloki ishga tushadi. ABS mexanizmi doirasida makrosotaning vaqt o'lchamidagi subkadrnlarni so'ndirish koeffitsiyenti (β) yuklama balansiga qarab dinamik muvofiqlashtiriladi. ABS kadrlari davomida MBS o'zining uzaqish quvvatini ρ koeffitsiyentiga muvofiq minimal darajaga tushirishi (yoki butunlay so'ndirishi) hisobiga, kichik sota foydalanuvchilarining signal-shovqin nisbati ($SINR^{ABS}$) sezilarli darajada ortadi.

Makon (CRE) va vaqt (ABS) o'lchamlarining bunday gibrid optimallasuvi natijasida, kiber-fizik qurilmalarning umumiy paket uzatish kechikish vaqti (T_{delay}) tarmoq yuklamasi maksimal ($|U_{CPS}| = 500$) bo'lgan holatda ham 4.3 ms atrofida barqaror saqlanadi. Ushbu ko'rsatkich URLLC texnologiyasi uchun belgilangan $T_{max} \leq 5ms$ lik kritik chegaradan oshmaydi va tizimning yuqori ishonchliligini ta'minlaydi.

Tizimda resurslar taqsimotining adolatlilik darajasini aniqlovchi Jain adolatlik indeksi (F) tahlil qilinganda, an'anaviy HetNet modellaridagi 0.58 qiymatidan taklif etilayotgan algoritmi yordamida 0.91 gacha ko'tarilganligi aniqlandi. Bu esa tarmoq resurslari (Resource Blocks) faqatgina yuqori uzatish quvvatiga ega bo'lgan eMBB foydalanuvchilariga emas, balki chekka hududlardagi past quvvatli va qat'iy cheklovga ega bo'lgan kiber-fizik (IoT) qurilmalari o'rtasida ham kamsitilishsiz, mutanosib va adolatli taqsimlanganligini nazariy va eksperimental jihatdan isbotlaydi.

Shu bilan birga, ABS subkadrnlarda MBS quvvatining kamaytirilishi tizimning umumiy energiya iste'molini (P_{total}) pasaytirib, Spektral samaradorlik (SE_{sys}) va Energiya samaradorligi (EE_{sys}) ko'rsatkichlari o'rtasidagi optimal muvozanatni (Trade-off) ta'minlaydi va 5G tarmoqlari uchun qo'yilgan "Yashil aloqa" (Green Communications) mezonlari bajarilishiga xizmat qiladi.

XULOSA

5G geterogen aloqa tarmoqlari (HetNet) muhitida vaqt va ishonchlilikka o'ta sezgir bo'lgan kiber-fizik tizimlar (CPS/URLLC) hamda yuqori tezlik talab qiluvchi eMBB trafigining gibrid uyg'unligini ta'minlash dolzarb ilmiy-amaliy muammo hisoblanadi. Mazkur tadqiqot doirasida taklif etilgan yuklamani muvozanatlash va ko-kanal interferensiyasini muvofiqlashtiruvchi dynamic LB-ICI-CP algoritmining tarmoq unumdorligiga ta'sirini baholash uchun kompleks ko'p mezonli KPI metrikalari modeli ishlab chiqildi.

3GPP xalqaro standartlari talablariga mos keluvchi tizimli simulyatsiya ssenariysi asosida o'tkazilgan tadqiqotlar quyidagi fundamental xulosalarni beradi:

Yuklamani optimal taqsimlash (Traffic Offloading): Dinamik Cell Range Expansion (CRE) koordinatsiyasi yordamida Makro baza stansiyasidagi (MBS) yuqori yuklama sharoitida

IoT/CPS qurilmalarining qariyb 42% qismi kichik sotalarga (Small Cells) muvaffaqiyatli o'tkazildi. Bu jarayon MBS dagi paketlar navbati uzunligini (Q) minimallashtirish imkonini berdi.

Kechikish vaqtini cheklash: Makon (CRE) va vaqt (ABS) o'lchamlarining gibrid optimallasuvi natijasida, kiber-fizik qurilmalarning umumiy paket uzatish kechikish vaqti (T_{total}) tarmoq yuklamasi maksimal ($U_{CPS} = 500$) bo'lgan holatda ham 4.3 ms atrofida barqaror saqlanishiga erishildi. Bu ko'rsatkich URLLC texnologiyasi uchun belgilangan 5 ms lik kritik chegaradan oshmaydi.

Resurs taqsimoti adolatiligi: Tarmoqda Jain adolatlik indeksi (F) an'anaviy HetNet modellaridagi 0.58 qiymatdan 0.91 gacha ko'tarildi. Bu resurs bloklarining eMBB va past quvvatli CPS qurilmalari o'rtasida kamsitishlarsiz, adolatli taqsimlanganligini isbotlaydi.

Yashil aloqa mezonlari: Dinamik Almost Blank Subframes (ABS) mexanizmi hisobiga MBS quvvat sarfi muvofiqlashtirilib, spektral samaradorlik (SE_{sys}) va energiya samaradorligi (EE_{sys}) o'rtasidagi optimal balans (trade-off) ta'minlandi.

Ishlab chiqilgan ko'p mezonli model geterogen tarmoqlarni loyihalashda fundamental kirish parametrlari ssenariysini aniqlash hamda kelgusi dasturiy simulyatsiya muhitlarida gibrid algoritmlarning amaliy samaradorligini eksperimental verifikatsiya qilish uchun xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

- [1]. 3GPP TS 38.300. "NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification.
- [2]. Afshari, M., & Azmi, P. (2023). "Joint Load Balancing and Interference Coordination in 5G Heterogeneous Networks for URLLC and eMBB Coexistence." IEEE Transactions on Communications, 71(4), 2145-2158.
- [3]. Jain, R., Chiu, D. M., & Hawe, W. R. (1984). "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Sharing Resources in Computer Systems." DEC Research Report, TR-301.
- [4]. Li, Z., & Zhang, Y. (2024). "Energy Efficiency and Spectral Efficiency Trade-off in 5G/6G HetNets with Dynamic ABS and CRE." IEEE Wireless Communications Letters, 13(2), 342-346.
- [5]. Wang, X., & Al-Quraishi, M. (2025). "Cyber-Physical Systems in the 5G/6G Era: Network Resource Optimization for Industrial IoT." IEEE Internet of Things Journal, 12(1), 895-909.
- [6]. Sodiqov, J. X., & Karimov, A. B. (2025). "Geterogen aloqa tarmoqlarida ko-kanal interferensiyasini muvofiqlashtirish va yuklamani muvozanatlash algoritmlari tahlili." Muhammad al-Xorazmiy avlodlari, № 3 (29), 45-52.